

Analyse et modélisation de la relation entre offre et demande en eau sur deux périmètres irrigués au Brésil

Erwin DE NYS*, Pierre-Yves LE GAL**, Dirk RAES*

*Katholieke Universiteit, Leuven, Belgique

**Cirad-Tera, TA 60/15 73, rue Jean-François Breton, 34 398 Montpellier cedex 5, France

Résumé – La confrontation de l'offre en eau des gestionnaires de périmètre irrigué avec les demandes des agriculteurs est source fréquente de conflits. Ceux-ci renvoient au fossé existant entre les normes de conception des aménagements et leur évolution ultérieure, que ce soit en termes structurels (surfaces irriguées, systèmes d'irrigation) ou fonctionnels (assolement, règles de gestion). Cette étude, basée sur une intervention conduite sur deux périmètres irrigués brésiliens, vise à concevoir un outil de simulation permettant d'aider gestionnaires et agriculteurs à négocier autour de nouvelles formes d'organisation de la distribution en eau. Nous montrons dans un premier temps comment l'évolution des cas étudiés a conduit à des tensions sur l'offre. Puis nous présentons la structure générale du modèle adoptée et les principes de calcul de la demande en eau des agriculteurs et de l'offre du gestionnaire. Un exemple simple de simulation vient illustrer la démarche employée. Nous montrons comment elle permet de passer d'indicateurs tels que la couverture des demandes par l'offre, à des considérations plus organisationnelles. Les perspectives offertes par ce travail en terme de conseil sont exposées en conclusion.

Abstract – Analysis and modelling of the water supply and demand relationship in two irrigated schemes in Brazil. Balancing the water supplied by irrigated managers with the farmers' demands is a frequent source of conflicts between them. These conflicts are rooted in the gap between the design standards of the schemes and their ulterior development regarding their structure (irrigated areas, irrigation systems) and their operation modes (crop pattern, management rules). This study based on an action-research conducted in two Brazilian irrigated schemes aims at designing a simulation tool that will support managers and farmers to negotiate new organizational patterns regarding the water distribution. In a first part we show how the two case studies have been facing strains on the water supply. Then we describe the general structure of the model and the calculation basis of both the farmers' water demands and the manager's supply. The approach is illustrated by an easy example of simulation which shows how to go from indicators such as the supply-demand ratio to some more organizational issues. Finally the interest of the study regarding decision support is discussed.

L'organisation de la distribution de l'eau sur un périmètre irrigué collectif représente un élément clé des relations entre la structure gestionnaire, dispensant le service et les agriculteurs qui en sont bénéficiaires (Le Gal *et al.*, 2000). Cette organisation renvoie à deux entités en interaction : d'une part, la gestion de l'offre par le gestionnaire, qui dépend d'aspects à la fois structurels (caractéristiques du réseau) et fonctionnels (règles et procédures de distribution), d'autre part, la construction des demandes des

agriculteurs, en fonction d'éléments qui dépassent les seuls besoins en eau des cultures (Rey, 1996 ; Lamacq, 1997, Leroy *et al.*, 1996).

Des conflits sont régulièrement observés entre gestionnaire et agriculteurs, liés à une mauvaise couverture des demandes par l'offre, à des gaspillages de la ressource aux différents niveaux du système, etc. Ces conflits se rattachent à une mauvaise adéquation entre les principes de conception des périmètres et leur utilisation réelle, tant du côté de l'offre que des demandes (Horst, 1998 ; Diemer et Huibers, 1996), ou à la difficulté d'adapter l'organisation existante à des évolutions institutionnelles, économiques ou agricoles.

Cette adaptation peut s'envisager sous plusieurs angles. L'offre peut être modifiée, à structure égale, en envisageant d'autres modes de distribution, ou par des investissements structurels (mise en place de réservoirs de stockage, modifications de capacité ou de techniques d'irrigation). Le gestionnaire peut également influencer les demandes en modifiant son système tarifaire (Montginoul, 1997).

Si les solutions envisageables sont multiples, leurs conséquences sur les performances du périmètre et des exploitations agricoles sont difficiles à évaluer dans toutes leurs dimensions. Il serait donc intéressant pour les gestionnaires et agriculteurs confrontés à des conflits récurrents ou à une évolution stratégique de leur périmètre, de bénéficier d'un appui à la définition de nouvelles règles de gestion de l'eau.

La plupart des outils développés pour les aider dans ce sens se réfèrent au pilotage quotidien de l'irrigation ou à sa planification sur une saison agricole. L'aide au pilotage concerne principalement le calcul de la dose et de la fréquence d'irrigation optimales par culture (Smith, 1992 ; Raes *et al.*, 1988). L'aide à la planification se limite souvent à la définition du calendrier agricole optimal pour la prochaine saison (Martinez *et al.*, 1996). Or, l'utilisation de ces outils par les structures gestionnaires semble être peu répandue (Itier *et al.*, 1995), et ils paraissent mal adaptés à la résolution de problèmes stratégiques.

A cet effet, d'autres approches montrent l'intérêt d'outils de simulation combinés à des supports de présentation relativement simples, pour aider la négociation entre gestionnaire et usagers autour de l'utilisation de l'eau (Barreteau *et al.*, 1998) ou de choix stratégiques tels que le mode de tarification de l'eau (Le Gal *et al.*, même séminaire). Ces outils visent à stimuler la réflexion des acteurs autour de la comparaison de scénarios alternatifs de gestion, susceptibles d'améliorer l'efficacité du service de l'eau.

Une telle approche est actuellement développée et expérimentée sur deux périmètres de la région de Petrolina-Juazeiro (Brésil), où l'évolution des assolements et des systèmes d'irrigation conduit les structures gestionnaires à s'interroger sur l'organisation future de la distribution de l'eau, avec ou sans l'introduction de nouveaux investissements hydrauliques. Ces questions s'inscrivent dans une situation conflictuelle, où les usagers jugent l'offre des gestionnaires insuffisante, ces derniers estimant à l'inverse injustifiées les demandes des agriculteurs, car exagérément élevées et traduisant une mauvaise utilisation de l'eau. Cette opposition de points de vue reflète deux représentations différentes des relations entre offre et demande en eau, l'une calée sur la satisfaction des besoins des usagers, l'autre sur les besoins en eau des cultures.

Après avoir présenté le contexte général de cette étude, nous exposons la structure du modèle adopté pour représenter ce problème. Puis nous illustrons sa mise en œuvre par quelques résultats de simulation portant sur la gestion d'un canal secondaire, avant de discuter des perspectives offertes par ce travail en cours.

Contexte de l'intervention

Le contexte général

La région d'étude est située dans l'intérieur du nordeste du Brésil, autour des villes de Petrolina (Pernambuco) et de Juazeiro (Bahia). Cette région est caractérisée par un climat semi-aride avec une distribution des pluies intra-annuelle et inter-annuelle très irrégulière du fait de sa situation aux confins de quatre grandes masses d'air (da Cunha Rebouças, 1972). La différence importante entre l'évapotranspiration et la pluviométrie annuelles moyennes (respectivement 1 890 mm et 550 mm) rend l'irrigation nécessaire pour satisfaire les besoins en eau des cultures, même pendant la période pluvieuse qui s'étend de novembre à avril. Grâce à la disponibilité en eau permanente du fleuve São Francisco et à des températures moyennes variant entre 24,5° C en juillet et 28,6° C en novembre, il est possible de cultiver sous irrigation toute l'année.

Depuis 1973, l'Etat brésilien installe, sur financements publics, des périmètres irrigués dans cette région, sous la responsabilité d'une société d'aménagement parapublique, la Codevasf (Compagnie de développement de la vallée du São Francisco). Les premiers périmètres ont été conçus dans une logique sociale visant à stabiliser la population rurale (Noël, 1995). Les agriculteurs ou « colons » se voient attribuer une superficie irrigable individuelle de six à huit hectares en moyenne. Depuis les années 80, les périmètres sont conçus pour accueillir aux côtés des colons, des petites et moyennes entreprises (Pme) exploitant des lots irrigués de plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'hectares.

Depuis la fin des années 80, l'Etat brésilien cherche à se désengager de la gestion des périmètres par la mise en place de structures autonomes conçues sur le modèle des districts nord-américains (Corrêa, 1996). Les districts sont responsables de l'offre en eau aux usagers aux plans opérationnels et financiers, alors que l'Etat reste propriétaire de l'infrastructure collective. Ils sont gérés par des professionnels, mais contrôlés par les usagers *via* leurs représentants aux conseils d'administration.

La région est caractérisée par une évolution rapide des systèmes de production. Les périmètres ont été conçus à l'origine pour des cultures à cycle court (melon, tomate, haricot, oignon) avant d'évoluer vers l'arboriculture fruitière (mangue, goyave, coco vert, raisin) et devenir un des pôles principaux de l'arboriculture fruitière au Brésil (Marinozzi, 2000). En parallèle, les initiatives privées ont impulsé une évolution vers des techniques d'irrigation plus sophistiquées (micro-aspiration, goutte à goutte), entraînant l'abandon du système gravitaire actuel dans la conception des futurs projets publics (Codevasf, 1995).

Les périmètres de Maniçoba et Mandacarú, sur lesquels porte cette étude, sont représentatifs de la diversité des projets publics du pôle Petrolina – Juazeiro (tableau I). Le périmètre de Mandacarú est de taille relativement réduite et composé uniquement de colons. La mise en valeur reste principalement concentrée sur les cultures annuelles avec une certaine dynamique vers l'arboriculture fruitière. Le périmètre de Maniçoba est plus grand et composé de divers usagers de l'eau (colons, Pme et une entreprise sucrière). Il a été conçu en fonction de cultures annuelles qui ont été largement remplacées par l'arboriculture fruitière.

Tableau I. Caractéristiques de projets de Mandacarú et Maniçoba.

	Mandacarú		Maniçoba	
Superficie totale	855 ha		12 315 ha	
Type de sols	Vertisols		Podzols	
Type d'usagers	Colons	Colons	Pme	Entreprise sucrière
Superficie irrigable	420 ha	1 800 ha	995 ha	1 470 ha
Nombre de lots	54	232	45	24
Superficie irrigable par lot	7 à 8 ha	6 à 10 ha	15 à 150 ha	20 à 80 ha
Electrification	Non	Non	Oui	Oui
Système d'irrigation	Gravitaire	Gravitaire	Gravitaire	Gravitaire
			Micro-aspiration	Pivot
Cultures en 1975				
Annuelles	98 %	95 %	60 %	+/- 90 %
Pérennes	2 %	5 %	40 %	
Cultures en 1999				
Annuelles	61 %	17 %	20 %	Canne à sucre
Pérennes	39 %	83 %	80 %	

La demande en eau des usagers

L'infrastructure des périmètres a été conçue suivant plusieurs hypothèses sur la demande et sur l'offre en eau (Sondotécnica, 1975) :

– le périmètre a été découpé en lots, unité de mise en valeur gérée par une exploitation agricole, et en sections hydrauliques regroupant plusieurs lots sur un même canal ;

– la demande théorique par lot a été calculée en fonction de sa superficie irrigable (S), d'un assolement type, des besoins nets en eau des cultures (I_{net}) et de l'efficacité d'application (E_a) ; les hypothèses suivantes ont été utilisées :

– S est égale à 7,5 ha pour tous les lots des colons ;

– l'assolement ne comprend que des cultures annuelles de cycle court (légumineuses, cultures maraîchères) ;

– I_{net} est calculé en fonction de l'évapotranspiration de la culture (ET_c) et de la pluie probable efficace (P_{eff}) ; ET_c dépend elle-même de l'évapotranspiration de référence (ET_0) du mois de pointe, multiplié par les coefficients culturaux (K_c) des cultures ;

– P_{eff} est considérée comme nulle pendant la période de pointe, de même que les autres apports d'eau telles que les remontées de nappe par capillarité ;

– E_a , rapport entre les besoins nets et les apports d'eau par irrigation, est égale à 50 %.

La demande en eau par section hydraulique a été évaluée sur la demande par lot, le nombre de lots à desservir par section, l'efficacité de distribution (E_{cs}) et l'indice d'occupation du sol moyen (I_e), selon les hypothèses suivantes :

– E_{cs} , rapport entre l'eau pompée et l'eau effectivement distribuée, est égale à 60 % ;

– le est fonction du calendrier cultural établi et des délais entre deux cycles successifs. Il est estimé égal à 65 %.

La mise en regard de ces hypothèses initiales avec la situation actuelle souligne les divergences suivantes, liées tant aux principes de calcul qu'aux évolutions des modes de mise en valeur au sein des périmètres :

– les surfaces irrigables par lot sont hétérogènes (entre 5 et 15 ha à Maniçoba) et plus importantes que prévues (+25 %), du fait de la mise en valeur, souvent illégale, de terres initialement non irrigables ;

– ET_0 a été sous-estimée d'environ 55 % par rapport à la méthode Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), malgré l'existence de données correctes (Hargreaves, 1974), pour des raisons mal élucidées ;

– bien que les assolements aient considérablement évolué, les références locales de K_c pour les cultures fruitières, d'ailleurs peu nombreuses, apparaissent équivalentes ou légèrement plus faibles que celles qui ont été retenues lors de la conception (Rodrigues da Silva, 2000) ; par contre, la canne à sucre consomme nettement plus d'eau en raison de K_c plus élevés (Allen *et al.*, *op.ct.*) ;

– le nombre de lots a augmenté sur certains périmètres (+10 % à Mandacarú) ;

– l'arboriculture fruitière, intercalée ou non avec des cultures à cycle court, occupe le sol toute l'année ; I_e tend alors vers la valeur maximale de 100 % ; dans la zone de canne à sucre, I_e est évalué à 90 % du fait du repos d'un mois entre deux cycles.

L'offre en eau du gestionnaire

Le dimensionnement des canaux et de la station de pompage se fonde sur les hypothèses suivantes de distribution de l'eau :

– pompage : 7 jours par semaine, 18 à 20 heures par jour (Sondotécnica, *op.ct.* ; Medeiros de Barros, 1973 ; Codevasf, 1995) ;

– irrigation des lots de colon : tous les trois jours sur cette plage horaire ;

– irrigation à la demande pour les entreprises.

Ces hypothèses se sont révélées rapidement irréalistes et incompatibles, d'une part, avec les pratiques des usagers et du gestionnaire, d'autre part, avec les évolutions technologiques et organisationnelles des périmètres. La durée d'ensoleillement journalier maximal est de 12 heures dans la région (Teixeira, 1998), ce qui suppose un travail de nuit dans la plage horaire de pompage proposée. La majorité des usagers s'est opposée à cette activité nocturne, pénible en irrigation gravitaire (manipulation de siphons, contrôle de l'irrigation des sillons), et entraînant un surcroît de travail par rapport aux activités diurnes. Les gestionnaires sont alors revenus à une irrigation de jour, sur 10 h quotidiennes.

Le travail de nuit oblige le gestionnaire à augmenter son équipe d'aiguadiers et à les protéger contre l'insécurité régnant sur les périmètres, le tout dans un contexte de contraction budgétaire. Par ailleurs, l'efficacité de distribution diminue en général la nuit car il est plus difficile d'ajuster l'offre, contrôlée manuellement par les aiguadiers, à la demande.

Le tour d'eau sur trois jours s'est également révélé difficile à mettre en oeuvre, car il implique pour un irrigant donné de changer ses jours d'irrigation d'une semaine à l'autre. Cela complique la planification de ses activités agricoles et l'oblige à travailler certains dimanches, ce qui est socialement mal accepté. Les gestionnaires sont donc passés à une rotation sur deux fois trois jours par semaine, avec dimanche chômé.

Dans ces conditions, l'offre en eau faite aux colons s'est trouvée réduite environ de moitié par rapport aux conditions initiales de conception. Pour compenser partiellement ce manque, des réservoirs collectifs et privés ont été mis en place. Leur remplissage est assuré durant la nuit sous le contrôle de quelques aiguadiers.

Cette analyse montre que les principes de conception adoptés à l'origine de ces projets ont été sérieusement mis à mal par la suite, que ce soit du fait d'utilisation de données fausses ou d'une mauvaise appréciation des évolutions agronomiques des périmètres et des contraintes organisationnelles qu'ils impliquaient. Face aux tensions provoquées par un accroissement de la demande et une diminution de l'offre par rapport aux hypothèses de base, les gestionnaires ont été amenés à s'adapter, en modifiant les modes de distribution de l'eau ou en investissant dans des équipements plus souples.

Ces décisions ont été prises par ajustements successifs, avec tous les risques de conflits et d'erreurs qu'entraîne une mauvaise évaluation des décisions prises et un déficit de planification. Dans ces conditions, il est apparu intéressant de développer un outil qui permette d'améliorer ce processus de réflexion, que ce soit au stade de la conception ou lors de crises et de changements importants dans l'histoire des périmètres.

Modélisation des relations entre offre et demandes en eau

Structure générale

Le modèle proposé vise à aider gestionnaires et agriculteurs à mesurer les conséquences d'un mode d'organisation de la distribution de l'eau sur la satisfaction des demandes et les rendements des cultures, en tenant compte de certains aléas tels que le climat, qui jouera sur la demande, et l'offre en amont du périmètre dont la disponibilité est parfois incertaine. Le modèle est conçu autour de trois modules (Le Gal *et al.*, 2000).

- Le module « offre » reproduit la structure du réseau, depuis la station de pompage jusqu'aux prises des agriculteurs, en passant par les différents nœuds de distribution de l'eau et d'éventuels réservoirs de stockage. A chaque composant sont associées ses caractéristiques hydrauliques et les règles de gestion définissant les volumes d'eau transférables ou stockables.
- Le module « demande » part du principe que les agriculteurs n'irriguent pas nécessairement, ni uniquement, en fonction des besoins en eau des cultures. Il permet de représenter la demande de chaque agriculteur en fonction de sa surface, de son assolement, de ses équipements hydrauliques et de ses règles de gestion de l'irrigation. Ce module reprend le formalisme conçu par Leroy *et al.* (1996) pour modéliser, puis simuler selon différents scénarios climatiques, la demande en eau d'une exploitation à l'aide du logiciel Irma (Labbé *et al.*, 2000).
- Le module « bilan hydrique » met en regard l'apport d'eau issu de la confrontation entre offre et demandes avec les besoins en eau des cultures. Cela permet de calculer un rendement relatif par culture et d'évaluer l'éventualité d'un excès d'eau, avec ses conséquences sur la remontée de la nappe phréatique et sur la salinisation des sols.

L'utilisation de cet outil, en cours de développement, est illustrée à travers le cas d'un canal secondaire relié à une station de pompage, dominant plusieurs lots et bénéficiant d'un réservoir de stockage. L'offre en eau du gestionnaire et les demandes agrégées des agriculteurs ont été simulées pour différents scénarios d'assolement et de techniques d'irrigation. La simulation est effectuée au pas de temps journalier, pour s'aligner sur la réalité opérationnelle et représenter les règles d'ajustement aux événements pluviométriques. La comparaison de l'offre et la demande est faite au pas de temps

décadaire, pour s'affranchir de certaines variations journalières difficilement modélisables. Les conséquences de cette comparaison sur les rendements relatifs des cultures ne seront pas présentées ici.

Modélisation de la demande en eau

Une typologie des demandes individuelles

La demande en eau sur le canal est calculée en agrégeant les demandes des lots individuels. Chaque lot se voit attribuer une demande type. Le poids de chaque type est fonction du nombre de lots qui le concerne. D'où :

$$D_{CS} = \sum_{i=1}^n D_{type,i} \cdot x_{type,i}$$

où D_{CS} : demande agrégée des usagers par canal secondaire (m³/jour) ;

D_{type} : demande d'un lot type (m³/jour) ;

x_{type} : nombre de lots correspondant au type ;

n : nombre de types différents sur le canal secondaire.

Cette représentation demande une validation (i) de la typologie des lots, fondée sur le contexte d'action (assolement et superficies irriguées) et le modèle d'action de l'agriculteur (programmation de la conduite de l'irrigation par culture) par type et (ii) une estimation du poids de chaque type sur le canal. Ainsi, la typologie des lots construite sur le canal secondaire CS 201 à Maniçoba, qui dessert 56 colons, s'appuie sur la superficie irriguée totale par lot et la superficie irriguée par culture, en distinguant les trois cultures principales sur le périmètre (mangue, goyave, coco vert) et deux stades physiologiques des vergers (croissance et en production) (tableau II).

Cette classification a l'avantage de s'appuyer sur des variables relativement faciles à obtenir sur le terrain, et parfois déjà disponibles dans les bases de données des périmètres. Mais elle manque d'une dimension fonctionnelle par rapport à des typologies intégrant les stratégies des agriculteurs en matière d'irrigation ou d'assolement (Verbrugge, 2000 ; Jehan, 2000). Il est donc souhaitable d'évaluer les relations entre les critères simples retenus ici et des analyses plus approfondies du comportement des agriculteurs.

Tableau II. Typologie des colons sur le canal Cs 201, en fonction des assolements actuels et d'une augmentation de surface irriguée de 20 %.

Situation actuelle (ha)				Mangue		Goyave		Coco		Poids absolu
Classe	S irrigable	S pluviale (*)	S irriguée	np	p	np	p	np	p	
1	9	9,5	15	-	6	-	5	-	4	4
2	8	4	10	-	3	2	1,5	0,5	3	7
3	7,5	4,5	7,5	-	3	1,5	1,5	-	1,5	27
4	7,5	6	5	-	2	1	1	-	1	18

Augmentation de la superficie irriguée (ha)				Mangue		Goyave		Coco		Poids absolu
Classe	S irrigable	S pluviale (*)	S irriguée	np	p	np	p	np	p	
1	9	9,5	18	2	6	1	5	-	4	4
2	8	4	12	2	3	2	1,5	0,5	3	7
3	7,5	4,5	9	-	3	1,5	1,5	1,5	1,5	27
4	7,5	6	6	1	2	1	1	-	1	18

np : âge non-productif - p : âge productif
(*) : en théorie non-irrigable mais en pratique partiellement irrigué.

Principes d'utilisation du logiciel Irma

Au sein de chaque type, la demande en eau a été modélisée au moyen du logiciel Irma, qui permet de simuler au pas de temps journalier des calendriers d'irrigation sur l'ensemble des parcelles irriguées d'une exploitation, selon différents scénarios climatiques. Le logiciel est construit sur une représentation du contexte et du modèle d'action de l'agriculteur. Le contexte d'action est caractérisé par le système d'irrigation (îlots d'irrigation, ressources, débits, matériels) et les parcelles à irriguer (appartenance à un îlot, dimensions, cultures, sols) de l'exploitation. Le modèle d'action concerne les règles de décision de l'agriculteur pour l'irrigation (définition de blocs gérés de façon homogène, programmes d'irrigation par bloc) et pour l'affectation du matériel.

Alors qu'Irma est conçu à l'origine pour des exploitations individuelles, on a souhaité l'utiliser ici dans un contexte collectif pour passer des demandes en eau de chaque type à la demande agrégée sur le canal. Pour ce faire, le logiciel a d'abord été testé sur trois exploitations étudiées en 1998 et 1999, afin de confronter sa structure à la situation brésilienne. L'adaptation s'est faite essentiellement par rapport au système d'irrigation (gravitaire plutôt qu'aspersion), au type de cultures (pérennes plutôt qu'annuelles) et à la période d'irrigation (toute l'année plutôt qu'une campagne estivale).

Les données d'entrée ont été obtenues par mesures (réserve utile du sol, superficie par parcelle), par observations (équipement d'irrigation, horaire de travail) ou par des entretiens avec l'agriculteur (programme de conduite par culture, ordre de priorité entre parcelles, règles en cas de pluie). Plusieurs problèmes se sont posés :

- certaines données sont indisponibles ou mal connues ; ainsi la station météorologique est éloignée d'une quarantaine de kilomètres, les dates d'installation des cultures annuelles ne sont pas connues précisément, de même que les coefficients cultureux et les profondeurs d'enracinement des cultures pérennes ;
- la validation des sorties d'Irma par comparaison avec les consommations réelles du lot bute sur l'imprécision des mesures réalisées par les aiguadiers, à partir de relevés sur une échelle limnimétrique trois fois par jour et par lot et une estimation des débits utilisés ; le volume consommé est obtenu en multipliant ces débits par la durée d'irrigation ;
- certains aléas journaliers viennent perturber ce processus de validation, tels que des coupures d'eau suite à un non-paiement des factures, le saut d'un tour d'eau suite à l'absence de main-d'œuvre ou, au contraire, la demande d'un jour supplémentaire pour des raisons échappant au programme d'irrigation ; ces décalages concernent 15 à 20 % des jours étudiés.

Pour lisser ces différences journalières, les volumes simulés par Irma pour les années de référence ont été comparés sur une base décadaire avec les volumes réellement consommés. Les résultats pour les lots étudiés montrent alors une adéquation des résultats d'environ 80 %.

Pour passer des cas individuels à la demande agrégée, chaque type défini plus haut a été modélisé et simulé, en adoptant les principes suivants (tableau III et figure 1 pour un exemple) :

- les types diffèrent par leur assolement et leur surface. ; la capacité des équipements d'irrigation (débit du canal parcellaire et nombre de siphons) sont proportionnels à la taille du lot ; le temps disponible quotidiennement pour l'irrigation est identique pour les différents types ;
- l'offre du canal est supposée non limitante pour la définition de la demande, de façon à confronter *in fine* une demande et une offre potentielles ;
- les règles de gestion de l'irrigation par culture au sein du lot, ne varient pas d'un type à l'autre ; les enquêtes conduites sur une trentaine d'exploitations montrent en effet une certaine diversité des règles programmées, mais un nivellement des pratiques liées aux contraintes du tour d'eau (Verbrugge, *op.ct.*) ; chaque culture est donc affectée d'un programme type ;
- en l'absence d'une connaissance précise des dates d'installation et de production des cultures, particulièrement maraîchères, les sorties sont agrégées par décade plutôt que par jour ; les sorties journalières montraient en effet des variations brutales et irréalistes des consommations en eau, de zéro à des valeurs très élevées, dues à une trop grande homogénéité des calendriers cultureux simulés d'un type à l'autre, alors que dans les calendriers réels sont beaucoup plus hétérogènes.

Sur ces bases, la demande agrégée sur le canal peut être calculée selon la formule précédente, pour différents scénarios variant par le contexte d'action des types (culture, superficies), leur modèle d'action (règles de conduite par culture) ou le poids des différents types sur le canal.

Tableau III. Simulation de la demande en eau par Irma pour le type 2 (simplifié).

a. Contexte d'action

sol sablo-limoneux ($R_u = 65$ mm) ; matériels : siphons (débit total de $110 \text{ m}^3/\text{h}$) ; période d'irrigation du 1/1/99 au 31/12/99.

Parcelle	Superficie (ha)	Culture	Stade	Superficie par position (ha)	Début de cycle
P 1	3	Mangue	Production	0,5	1/1
P 2	1,5	Goyave	Croissance	0,5	1/1
P 3	1,5	Goyave	Production	0,5	1/1
P 4	1,5	Coco vert	Production	0,5	1/1

b. Modèle d'action

Règles de conduite du goyavier en âge productif

Déclenchement	Répétition	Arrêt
Dès que jour > 1/1 et $R_u \leq 30$ mm	Tant que jour < 31/12 et dès que $R_u \leq 30$ mm	Jour > 31/12
Dose = 30 mm	Dose = 30 mm	-

Règles de report de l'irrigation après les pluies

Si pluie	journalière sur 2 jours	≥ 12 mm ≥ 15 mm	pas d'irrigation
Attente maximale de 12 jours après une pluie			

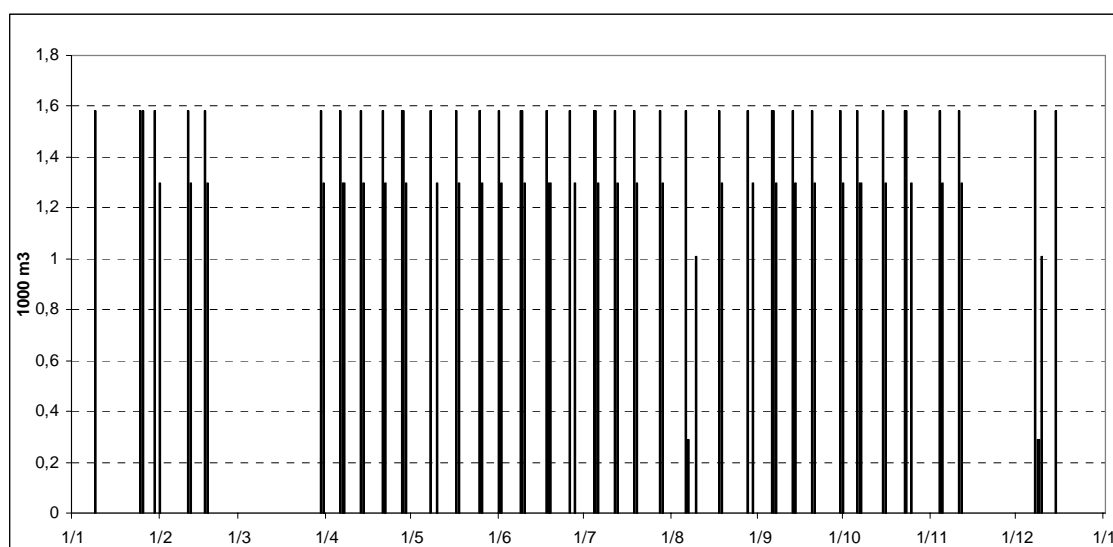


Figure 1. Simulation de la demande en eau du type 2 (m^3/jour - 1999).

Modélisation de l'offre en eau

L'objectif est de simuler l'offre globale au niveau d'un canal secondaire (Cs) sur un pas de temps décadaire. Sur le Cs peuvent se trouver des réservoirs de compensation qui sont généralement remplis la

nuits, parfois pendant la journée lorsque la demande est inférieure à l'offre. Les règles de gestion de l'offre sont déterminées par des restrictions structurelles (capacité du réseau, réservoir, maintenance) et organisationnelles (tour d'eau, durée d'irrigation). Dans cette représentation globale, sont exclus les problèmes posés par le pilotage journalier de l'offre, notamment les temps d'inertie, et par sa répartition entre canaux tertiaires et quaternaires.

L'offre potentielle décadaire d'un canal secondaire (Cs) dépend de l'offre journalière et du nombre de jours irrigables par décade :

$$Offre_{CS} = V_{CS, jour} \cdot n_{jour}$$

où $offre_{CS}$: offre potentielle du CS par décade ($m^3/décade$) ;
 $V_{CS, jour}$: offre potentielle du CS par jour ($m^3/jour$) ;
 n_{jour} : jours irrigables par décade.

L'offre journalière du Cs dépend de l'offre directe de la station de pompage et de la vidange des réservoirs collectifs sur le Cs. L'offre directe aux usagers dépend des capacités de pompage direct par la station de pompage, de transport par le Cs et de transfert aux lots. Le volume pompé par la station de pompage est composé de la partie destinée au Cs et d'une partie potentiellement déviable vers d'autres canaux, par un système de *by-pass*. Le volume transportable par le Cs dépend de la capacité du canal et du nombre d'heures de pompage.

Le volume en eau transférable aux lots est déterminé par le tour d'eau, caractérisé par le nombre de prises individuelles sur le Cs autorisées à irriguer simultanément, le débit nominal de chaque prise et la durée d'irrigation autorisée :

$$V_{tf-lot} = \sum_{i=1}^n Q_{lot,i} \cdot h_{lot}$$

où $Q_{lot,i}$: débit nominal par prise individuelle (m^3/h) ;
 h_{lot} : heures d'irrigation autorisées par prise ($h/jour$) ;
 n : nombre de prises individuelles sur le Cs autorisées à irriguer par jour.

La vidange des réservoirs collectifs est calculée en fonction des capacités de transport par les Cs, de transfert aux réservoirs et de stockage des réservoirs. On suppose ici que la capacité du canal en aval du réservoir est au maximum égal à la capacité en tête du canal secondaire.

Le taux de couverture de la demande des usagers par l'offre du gestionnaire est calculée en fonction de l'efficacité de distribution du canal secondaire :

$$T_{glob} = E_{CS} \frac{Offre_{CS}}{D_{CS}}$$

où E_{CS} : efficacité de distribution du canal secondaire (%) ;
 $offre_{CS}$: offre en eau du canal secondaire ($m^3/décade$) ;
 D_{CS} : demande en eau du canal secondaire ($m^3/décade$).

L'efficacité de distribution du canal secondaire (E_{CS}) représente la partie du volume déversé qui est réellement fournie à l'ensemble des lots. A défaut de mesures précises, on se réfère ici aux données globales mensuelles relevées à Maniçoba (bon entretien des canaux, aiguadiers professionnels, bonne coordination), qui varient entre 75 et 75 %, et à Mandacarú (entretien négligé, aiguadiers semi-professionnels), où l'efficacité se situe entre 35 et 50 %.

Compte tenu des marges d'erreur sur l'évaluation des paramètres, seules des tendances peuvent être tirées des simulations. Ainsi une valeur supérieure à 100 % indique que la demande en eau est couverte par l'offre avec une certaine souplesse sur les paramètres du scénario choisi (structure, organisation, niveau d'efficacité). A l'inverse, une valeur inférieure à 100 % signale un risque de tension entre le gestionnaire et les usagers, et la nécessité de revoir certains paramètres du système.

Exemples de simulations

Les scénarios retenus à titre d'exemple sont simulés en période de pointe (saison sèche de mai à novembre 1999), avec deux hypothèses sur la demande en eau, (a) la demande actuelle, (b) une augmentation de 20 % de la superficie irriguée, et trois types d'offres en eau : (A) alimentation uniquement par pompe pendant 18 heures par jour, soit l'offre planifiée par les concepteurs du projet ; (B) alimentation par pompe, complétée par le réservoir et par le *by-pass* pendant 10 heures par jour, soit l'offre actuelle et (C) le système précédent pendant 12 heures par jour (tableau IV).

On constate que, si l'offre potentielle actuelle (scénario B) permet de couvrir la demande actuelle, sa marge de manoeuvre est néanmoins minime (figure 2). D'autant que la durabilité de cette offre paraît compromise par l'utilisation incertaine du *by-pass*, conçu à l'origine pour pallier des déficits ponctuels et non pour une utilisation constante, alors que les demandes des usagers vont en augmentant.

Pour la même offre (scénario B), une augmentation de la superficie irriguée entraînerait un déficit de l'offre supérieur à 10 % (figure 3), qui concernerait 73 ha de vergers pendant au moins un quart de la période de pointe. Pour limiter ce déficit, il est possible de rallonger la durée d'irrigation (scénario C). Mais cela suppose que les agriculteurs acceptent d'être présents plus longtemps sur le périmètre, voire de travailler de nuit.

Ces exemples simples permettent d'illustrer l'intérêt du modèle pour combiner une réflexion sur l'offre du gestionnaire et ses conséquences sur les comportements attendus ou espérés des agriculteurs. Les marges de manoeuvre étant à rechercher chez ces deux types d'acteurs, la démarche se positionne clairement à leur interface et vise à faciliter leurs processus de négociation. Cet objectif sera évalué dans la poursuite de cette intervention, à travers des scénarios plus complexes simulés sur les deux périmètres étudiés.

Tableau IV. Trois scénarios d'organisation de l'offre en eau.

	Pompe		<i>By-pass</i>		Réservoir	
	m ³ /h	h/jour	m ³ /h	h/jour	m ³ /h	h/jour
Scénario A conception	1 830	18	-	-	-	-
Scénario B actuel	1 830	10	330	10	235	10
Scénario C hypothétique	1 830	12	330	12	235	12

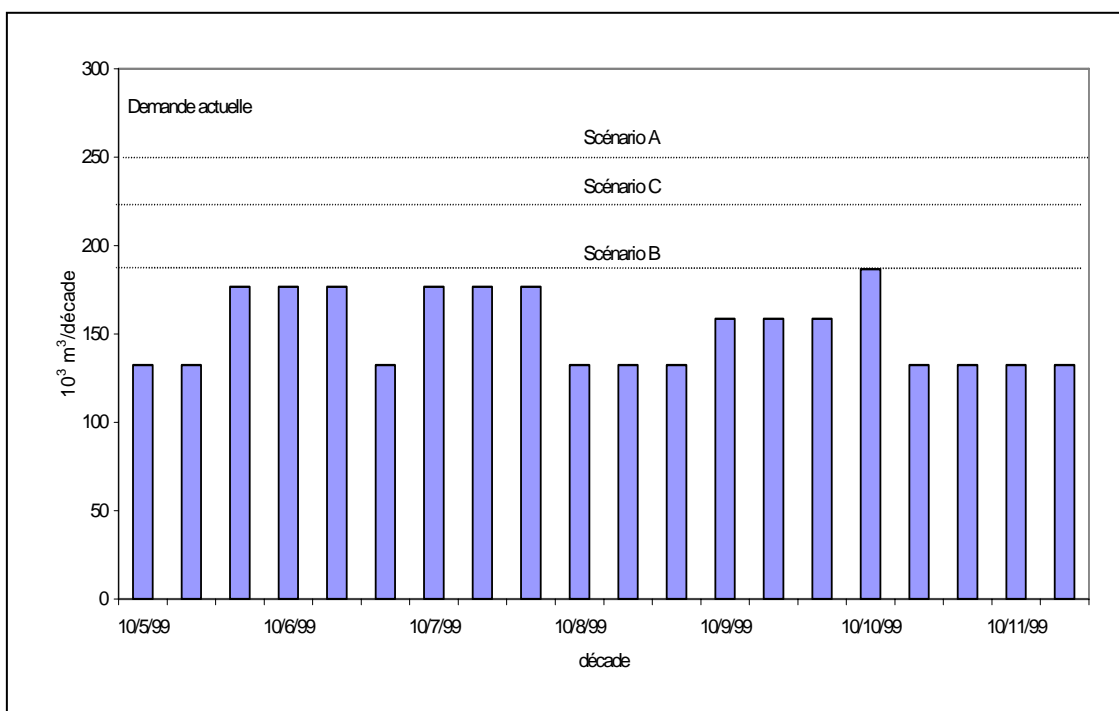


Figure 2. Comparaison de scénarios d'offre en eau (A,B et C) face à la demande actuelle au pas de temps décadaire.

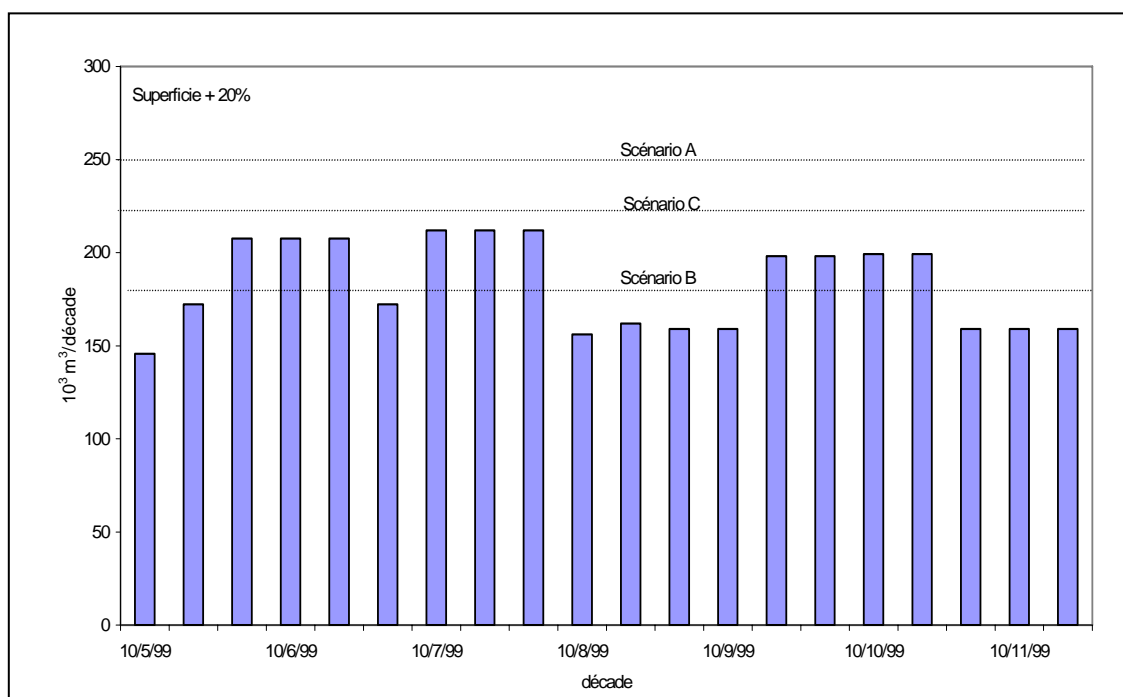


Figure 3. Comparaison de scénarios d'offre en eau (A,B et C) en cas d'accroissement de la superficie de 20% au pas de temps décadaire.

Conclusions et perspectives

Dans sa structure actuelle, la modélisation adoptée permet de simuler avec une certaine précision par rapport à la réalité, différents scénarios d'offre et de demandes en eau sur un périmètre irrigué, dans l'objectif d'aider gestionnaires et usagers à réfléchir à de nouvelles formes d'organisation ou d'investissements en fonction de l'aléa climatique (prise en compte d'années types, sèches et humides). Le modèle s'adapte à des cas spécifiques, sous réserve de l'existence des données nécessaires pour le paramétrer. Le degré de précision décadaire des sorties paraît suffisant pour définir les ordres de grandeur sur lesquels la discussion pourra s'engager et les idées de scénarios germer.

Les premières réactions enregistrées lors de son utilisation sur le périmètre de Maniçoba, montrent tout d'abord l'intérêt de la démarche pour amener les acteurs à renouveler leurs représentations des processus de gestion de l'irrigation. Ainsi les gestionnaires sont informés des modalités par lesquelles les agriculteurs construisent leurs demandes réelles en eau, souvent bien éloignées des manuels hydrauliques et agronomiques. Mais à l'inverse, les producteurs ont l'occasion de confronter leurs pratiques d'irrigation aux connaissances sur les besoins en eau des cultures ou sur l'incidence des remontées capillaires en provenance des nappes superficielles présentes dans leurs lots. Les problèmes de pilotage de l'irrigation peuvent alors être soulevés et discutés à cette occasion, aux différentes échelles où ils se posent : parcelle, lot et réseau hydraulique.

Au-delà de ces aspects de formation mutuelle, les discussions prennent une dimension plus stratégique. Les acteurs relient en effet ces questions d'ordre hydraulique aux problèmes financiers et économiques générés par un changement dans le service de l'eau. Quelles incidences en attendre sur les coûts d'investissement et de fonctionnement ? Quels seront les effets d'un changement de tarification sur la demande en eau des agriculteurs ? Ces relations entre les différentes composantes du système « périmètre irrigué » amèneront à l'avenir à coupler cette approche hydraulique avec une approche économique développée parallèlement (Le Gal *et al.*, 2002). C'est également dans ce cadre intégrateur que sera envisagée l'utilisation de la démarche comme une aide à la conception, destinée cette fois-ci aux ingénieurs et techniciens chargés de cette étape cruciale dans la vie d'un périmètre irrigué. Cette évolution s'accompagnera d'une réflexion sur la transférabilité des outils jusqu'ici développés et utilisés par les chercheurs.

Bibliographie

- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 1998. Crop evapotranspiration. Rome, Italie, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 300 p.
- BARRETEAU O., BOUSQUET F. 1998. Shadoc : un système multi-agent représentant les modes d'organisation dans un système irrigué. *In* L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde. Colloque SFER, 19-20 novembre 1998, Montpellier.
- CODEVASF, 1995. Projeto Salitre. Elaboração do projeto básico. Consórcio JP – ENCO – TAHAL. 203 p
- CORREA J.B., 1996. Distritos de irrigação : a experiência da CODEVASF. *In* Workshop sobre Modelos de Gerenciamentos de Áreas irrigadas. Brasília, Brésil, IICA, 6 p.
- Da CUNHA REBOUÇAS A., MARINHO M.E., 1972. Hidrologia das secas – Nordeste do Brasil. Recife, SUDENE. Divisão de Documentação, 126 p.
- DIEMER G., HUIBERS F.P., 1996. Crops, people and irrigation. Water allocation practices of farmers and engineers. Intermediate Technology Publications Ltd. 155 p.
- HARGREAVES G.H., 1974. Potential evapotranspiration and irrigation requirements for northeast Brazil. Utah State University, 56 p.
- HORST L., 1998. The Dilemmas of Water Division. International Water Management Institute. Wageningen Agricultural University, 123 p.

- ITIER B., MARAUX F., RUELLE P., DEUMIER J.M. 1996. Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and techniques. *In* Irrigation scheduling : from theory to practice. Rome, Italy, FAO Water Reports 8, p. 19-32.
- JEHAN C., 2000. Stratégies des producteurs individuels et gestion des exploitations agricoles : exemple de deux périmètres irrigués collectif au Brésil. Mémoire DAA. Paris, France, Ina-Pg, 59 p.
- LABBE F., RUELLE P., GARIN P., LEROY P., 2000. Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages. *European Journal of Agronomy*, 12 : 55-67.
- LAMACQ S., 1997. Coordination entre l'offre et la demande en eau sur un périmètre irrigué. Des scénarios, des systèmes, des hommes. Thèse de doctorat, ENGREF, 134 p.
- LE GAL P.-Y., de NYS E., PASSOUANT M., RAES D., RIEU T., 2000. Recherche-intervention, modélisation et aide à la décision collective : application à la gestion des périmètres irrigués. *In* Le pilotage des agro-écosystèmes : complémentarités terrain-modélisation et aide à la décision. Montpellier, France, Cirad, 31/8/2000.
- LE GAL P.-Y., RIEU T., GARCIA R., FALL CH., de NYS E. Apports de la simulation pour l'aide au choix d'un système tarifaire sur les périmètres irrigués. Séminaire Pcsi , « La gestion des périmètres irrigués collectifs à l'aube du 21^{ème} siècle : enjeux, problèmes, démarches », Montpellier, 3-4 janvier 2001.
- LEROY P., BALAS B., DEUMIER J.-M., JACQUIN C., PLAUBORG F., 1996. Water management at farm level. Final Report 1991-1995 of EU CAMAR Project : The management of limited resources in water and their agroeconomical consequences. Chapter IV, 89-151.
- MARTINEZ R., ARTEAGA R., SANCHEZ R. 1996. A computer programme for Irrigation Scheduling. *In* 1996 International Conference Computers in Agriculture, 11-14 juin 1996, Cancun, Mexico.
- MARINOZZI G., 2000. Stratégies collectives et dispositifs de commercialisation : l'essor de la fruticulture irriguée à Juazeiro Petrolina (Nordeste du Brésil). Thèse Doctorat, INP Toulouse, 293 p.
- MEDEIROS de BARROS G., 1973. Informações sobre o projeto piloto de irrigação de Mandacará. SUDENE – IICA – CIDIAT, 42 p.
- MONTGINOUL M., 1997. Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : des instruments, de l'information et des acteurs. Thèse Doctorat, Cemagref, UM I, Montpellier, 282 p. + annexes.
- NOËL A., 1995. Les stratégies collectives de la gestion de l'eau dans les périmètres irrigués : étude de cas à Petrolina et Juazeiro (Nordeste, Brésil). Mémoire Dea Essor, Ensat – Utm – Enfa. 65 p.
- RAES D., LEMMENS H., Van AELST P., VANDEN BULCKE M., SMITH M., 1988. IRSIS irrigation scheduling information system. Volume 1 – Manual, 119 p.
- REY J., 1996. Apport de la gestion industrielle au management des périmètres irrigués : comment mieux piloter la production ? Thèse de Doctorat en Ingénierie et Gestion de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre de Gestion Scientifique. 177 p.
- RODRIGUES da SILVA, V. de PAULO. 2000. Estimativa das necessidades hídricas da mangueira. Tese de doutorado em recursos naturais. Universidade Federal de Paraíba Campus II – Campina Grande. 129 p.
- SMITH, M., 1992. CROPWAT un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation. Rome, Italie, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 46, 133 p.
- SONDOTECNICA, 1975. Projeto Maniçoba Volume I, Descrição das obras e orçamento. Ministério do Interior, SUVALE, 117 p + annexes.
- TEIXEIRA, A.H. 1998. Influência do Rio São Francisco no microclima de suas margens. Embrapa/Cpatsa, Petrolina-PE. 6 p.
- VERBRUGGE H., 2000. Karakterisering en evaluatie van de watervraag van landbouwers op collectieve irrigatie-perimeters in noordoost - Brazilië. KU Leuven, 109 p.